木麻黄纯林及其混交林对土壤剖面理化性质的影响

王小燕[1]，薛杨[1]，宿少锋[1]，林之盼[1]，雷湘龄[1]，王耀山[2*]
(1. 海南省林业科学研究院，海口 571100；2. 海南省农业学校，海口 571100)

摘要：为明确混交林对木麻黄林地土壤肥力的改善作用，该文选取海南岛北部滨海沙地木麻黄纯林、木麻黄-琼崖海棠混交林、木麻黄-大叶相思混交林等 3 种林分类型，通过采集土壤剖面样品，分析腐殖质层、0~100 cm 土壤各层次的理化性质、分布特征及其林分间差异。结果表明：（1）与纯林相比，木麻黄-琼崖海棠混交林可显著提高腐殖质层以及 20~40 cm 土壤层 pH，增幅分别为 6.11%和 5.97%。（2）与纯林相比，木麻黄-琼崖海棠混交林、大叶相思混交林均可显著提高各层土壤的有机碳和全氮含量，有机碳含量增幅分别为 69.8%~358.3%和 90.2%~908.3%，全氮含量增幅分别为 44.1%~160.7%和 31.4%~210.7%；另外，木麻黄-琼崖海棠混交林还可显著提高 0~100 cm 各土层的全磷含量，增幅为 20.8%~39.6%，而木麻黄-大叶相思混交林可显著提高 20~100 cm 各土层的全磷含量，增幅为 25.0%~39.6%；木麻黄-大叶相思混交林对腐殖质层速效养分的改善效果较好，而两种混交林均可显著提高各土层的速效钾含量。（3）方差分析表明，林分类型和土层深度对林下有机碳、全氮、全磷、有效磷、硝态氮和铵态氮含量均有极显著的交互作用影响。综上结果认为，木麻黄混交林对林下土壤肥力具有明显的改善作用。建议在构建木麻黄防风林时应重点考虑混交林模式，尤其是与大叶相思混交林的种植模式来更好地提升土壤肥力，以保障可持续生产。

关键词：木麻黄，混交林，海南岛，土壤剖面，理化性质
中图分类号：Q948　　　　**文献标识码：**A

Effects of pure and mixed stands of *Casuarina equisetifolia*on soil profile physico-chemical properties

WANG Xiaoyan[1], XUE Yang[1], SU Shaofeng[1], LIN Zhipan[1], LEI Xiangling[1], WANG Yaoshan[2*]
(1. *Hainan Academy of Forestry*, Haikou 571100, China; 2. *Hainan Agricultural School*, Haikou 571100, China)

Abstract: In order to clarify the improvement effect of mixed plantations on soil fertility of *Casuarina equisetifolia* plantation, three forest plantation were selected, i.e. pure plantation of *Casuarina equisetifolia*, mixed plantation with *Casuarina equisetifolia* and *Calophyllum inophyllum*, mixed plantation with *Casuarina equisetifolia* and *Acacia auriculiformis* in coastal sandy land at Northern Hainan Island. By collecting soil profile samples from different plantations, the distribution characteristics of soil physico-chemical propertiesand their differences among plantations were discussed. The results were as follows: (1) Compared with the pure plantation of *Casuarina equisetifolia*, the mixed plantation with *Casuarina equisetifolia* and *Calophyllum inophyllum* significantly increased pH by 6.11% and 5.97% at the humus horizon and 20-40 cm soil depth, respectively. (2) Compared with the pure plantation of *Casuarina equisetifolia*, the contents of soil organic carbon (SOC) was increased by 69.8%-358.3% and 90.2%-908.3%, and the contents of soil total nitrogen (TN) was increased by 44.1%-160.7% and 31.4%-210.7% in humus horizon and different soil depth from 0-100 cm, respectively; The contents of soil

收稿日期：2021-04-07
基金项目：海南省科研院所技术创新专项基础性科研工作（jcxk202003）；国家林业公益性行业科研专项（201304320）[Supported by Technical Innovation Special Basic Scientific Research Work of Scientific Research Institutes in Hainan Province (jcxk202003); the National Forestry Public Welfare Profession Scientific Research Special (201304320)]。

作者简介：王小燕（1983-），林业工程师，研究方向为森林生态学，（E-mail）77671524@qq.com。
***通信作者：**王耀山，硕士，高级讲师，研究方向为森林生态学，（E-mail）20521610@qq.com。

total phosphorus (TP) increased by 20.8%-39.6% in different soil depth from 0-100 cm in mixed plantation with *Casuarina equisetifolia* and *Calophyllum inophyllum*, and increased by 25.0%-39.6% of 20-100 cm soil depth of mixed plantation with *Casuarina equisetifolia* and *Acacia auriculiformis*; The mixed plantation with *Casuarina equisetifolia* and *Acacia auriculiformis* showed the better improving effect on available nutrients in humus horizon than the other plantations, while both mixed plantations could significantly increase the available potassium content in different soil depth. (3) Variance analysis showed that plantation type and soil depth had significantly interactive effects on the contents of SOC, TN, TP, available phosphorus (AP), nitrate nitrogen (NO_3^--N) and Ammonium nitrogen (NH_4^+-N). In conclusion, the mixed *Casuarina equisetifolia* plantations could significantly improve the soil fertility compare to the pure plantation. Hence, in order to ensure the sustainable production, more attention should be paid to the mixed plantation structures, especially with *Acacia auriculiformis*, to get better fertility.
Keywords: *Casuarina equisetifolia*, mixed plantation, Hainan Island, soil profile, physico-chemical property

木麻黄（*Casuarina equisetifolia*）原产于澳大利亚、越南等国，自 20 世纪 50 年代被引入我国以来，已成为我国东南沿海防护林的主栽树种，从福建至广东、海南，其种植区域达数千公里，面积达 30 万 ha（仲崇禄等，2005）。木麻黄具有生长迅速、防风固沙强、抗御海潮及风暴、改善沿海生态环境、提供用材等作用，经过多年的栽培，已显现出相当好的地域适应性（Chen et al., 2018；杨彬和郝清玉，2020），并且有力地推动了沿海地区经济稳步发展，保障了沿海居民的稳定生活（杜建会等，2014）。海南岛位于我国南海北部，具有 1 528.4 km 的海岸线，其中宜林海岸线长达 1 105 km，约占总海岸线长的 72.03%（姚晓静等，2013）。木麻黄防护林在海南岛海岸线的大面积构建，全岛风沙危害问题基本得到了解决（刘成路等，2013）。

由于木麻黄人工林树种组成单一化严重、结构配置重视不足，多代连栽和林分结构较为简单，木麻黄林逐渐出现了较多的生态问题，如林带稳定性和生物多样性下降、自身遗传多样性降低、病虫害频发、林地碳汇功能减弱、土壤整体地力衰退、防护效能减弱，甚至造成生态环境的恶化（Leelamanie, 2016；王璇等，2017；徐志霞等，2018）。冯剑等（2016）通过研究榄仁树与木麻黄的混交林型，发现木麻黄的根系、凋落物等化感物质均降低了榄仁树幼苗的存活率，并影响其幼苗生长发育。黄舒静等（2009）研究发现，木麻黄化感物质对自身幼苗的生长也有明显的抑制作用，这种化感物质积累、林地土壤养分耗竭等也是造成木麻黄自身更新困难的主要原因。Zhou et al.(2019)研究表明，长期纯林的种植模式加剧了木麻黄根际土壤的微生态失衡，并显著降低了土壤微生物群落结构，造成土壤退化。目前普遍认为，营造良好的混交林是提高人工林生物多样性和生态稳定性的有效措施，而且还在地力衰退的防治方面发挥重要作用（盛炜彤，2018；Pereira et al., 2019）。综上所述，针对目前木麻黄林分结构单一造成的土壤肥力衰退等问题，本研究在海南北部海岸线选取了 3 种林分类型（木麻黄纯林，木麻黄和琼崖海棠混交林，木麻黄和大叶相思混交林，其中琼崖海棠和大叶相思已被证实是具有较强更新潜力的树种），通过分析林下土壤剖面理化性质分布特征及其林分间的差异，探讨防护林结构对土壤肥力指标的影响，以期达到增强林带稳定性和防护功能连续性、改善土壤肥力的目的，最终为我国东南沿海木麻黄防护林体系建设提供树种选择和配置依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域为海南省海口市灵山镇后尾村，位于海南省东北部海岸带，地理位置 115°58′31.0″ E，40°27′35.5″ N，该区域地势平坦，海拔高度在 8~10 m。属热带海洋性季风气候，为湿润气候区，干湿季节明显，年均降雨量为 1 684 mm，多集中于 5—9 月，年均气温为 23.8 ℃。土壤类型为海风、海水搬运后形成的砂质砖红壤，土壤疏松且水肥条件较差。

1.2 样地布设、土样采集及测定

试验选取该区域代表性的 3 种林分类型，分别为木麻黄纯林（*Casuarina equisetifolia*）、木麻黄-琼崖海棠混交林（*Casuarina equisetifolia*×*Calophyllum inophyllum*）、木麻黄-大叶相思混交林（*Casuarina equisetifolia*×*Acacia auriculiformis*）。样地基本概况如表 1 所示，林下主要草本植被类型如表 2 所示。采用

典型取样方法，如图 1 所示，在以上 3 种林分中各设置 3 个 20 m ×20 m 的代表性方形样方，在每个样方中选择代表性的土壤调查地段，各挖取 1 个 0~100 cm 的土壤剖面，除去凋落物层后，按照 O 层（腐殖质层）、0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm 土层分层取混合土样，共计 45 个土样，其中通过观察确定土壤腐殖质层（色暗、疏松），其与表层土壤具有明显差异。将所有样品带回实验室，经风干、磨细过筛后，用于土壤理化性状的测定（鲁如坤，2000）。分别采用电位法测定 pH，重铬酸钾—外加热法测定有机碳，半微量定氮法测定全氮，酸溶—钼锑抗比色法测定全磷含量，碱溶—火焰光度计法测定全钾含量，BrayI提取—钼锑抗吸光光度法测定有效磷含量，乙酸铵浸提—火焰光度计法测定速效钾含量，氯化钾浸提-连续流动分析仪法测定硝态氮和铵态氮含量。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic general situation of experimental sites

样地林 Sample site	科 Family	属 Genus	物种名 Species	种植时间 Plant time	平均胸径 Average diameter (cm)	平均高度 Average height (m)	平均冠幅 Average crown width (m × m)	草本盖度 Herbage coverage (%)	凋落物厚度 Litter thickness (cm)
木麻黄纯林 *Casuarina equisetifolia* (*Cas.*)	木麻黄科 Casuarinaceae	木麻黄属 *Casuarina*	木麻黄 *Casuarina equisetifolia*	2009	17.2	11.3	4.0×3.7	50~55	5.1
木麻黄-琼崖海棠混交林 *Casuarina equisetifolia* × *Calophyllum inophyllum* (*Cas.*× *Cal.*)	木麻黄科 Casuarmceae	木麻黄属 *Casuarina*	木麻黄 *Casuarina equisetifolia*	2004	20.5	10.0	3.8×3.5	75~80	8.1
	藤黄科 Calophyllaceae	红厚壳属 *Calophyllum*	琼崖海棠 *Calophyllum inophyllum*	2005	2.0	2.2	0.6×1.1		
木麻黄-大叶相思混交林 *Casuarina equisetifolia* × *Acacia auriculiformis* (*Cas.*× *Aca.*)	木麻黄科 Casuarmceae	木麻黄属 *Casuarina*	木麻黄 *Casuarina equisetifolia*	2007	12.5	9.2	3.0×3.2	50~55	6.2
	豆科 Fabaceae	金合欢属 *Acacia*	大叶相思 *Acacia auriculiformis*	2007	10.5	8.0	3.5×3.8		



分别代表木麻黄、琼崖海棠和大叶相思；▲代表剖面采样点。

indicate *Casuarina equisetifolia*, *Calophyllum inophyllum and Acacia auriculiformis*, respectively; ▲ indicates the soil sampling sites.

图 1 不同林分类型种植示意图

Fig. 1 Planting diagram of different plantations

表 2 样地林下主要草本层植被类型

Table 2 Herbaceous vegetation types of experimental sites

木麻黄纯林	木麻黄-琼崖海棠混交林	木麻黄-大叶相思混交林

Casuarina equisetifolia			*Casuarina equisetifolia* × *Calophyllum inophyllum*			*Casuarina equisetifolia* × *Acacia auriculiformis*		
科 Family	属 Genus	种名 Species	科 Family	属 Genus	种名 Species	科 Family	属 Genus	种名 Species
菊科 Asteraceae	胜红蓟属 *Ageratum*	胜红蓟 *Ageratum conyzoides*	菊科 Asteraceae	胜红蓟属 *Ageratum*	胜红蓟 *Ageratum conyzoides*	禾本科 Poaceae	狗牙根属 *Cynodon*	狗牙根 *Cynodon dactylon*
				泽兰属 *Chromolaena*	飞机草 *Chromolaena odorata*		地毯草属 *Axonopus*	地毯草 *Axonopus compressus*
	泽兰属 *Chromolaena*	飞机草 *Chromolaena odorata*	大戟科 Euphorbiaceae	地杨桃属 *Sebastiania*	地杨桃 *Sebastiania chamaelea*		黍属 *Panicum*	铺地黍 *Panicum repens*
	斑鸠菊属 *Vernonia*	夜香牛 *Vernonia cinerea*		油柑属 *Phyllanthus*	叶下珠 *Phyllanthus urinaria*		鸭嘴草属 *Ischaemum*	鸭嘴草 *Ischaemum ciliare*
	一点红属 *Emilia*	一点红 *Emilia sonchifolia*	茜草科 Rubiaceae	鸡屎藤属 *Paederia*	鸡屎藤 *Paederia foetida*	豆科 Fabaceae	刀豆属 *Canavalia*	海刀豆 *Canavalia maritima*
禾本科 Poaceae	黍属 *Panicum*	短叶黍 *Panicum brevifolium*		丰花草属 *Borreria*	丰花草 *Borreria stricta*	黄眼草科 Xyridaceae	黄眼草属 *Xyris*	黄眼草 *Xyris indica*
	结缕草属 *Zoysia*	结缕草 *Zoysia japonica*	禾本科 Poaceae	狗牙根属 *Cynodon*	狗牙根 *Cynodon dactylon*	茅膏菜科 Droseraceae	锦地罗属 *Drosera*	锦地罗 *Drosera burmanni*
茜草科 Rubiaceae	丰花草属 *Borreria*	丰花草 *Borreria stricta*	西番莲科 Passifloraceae	西番莲属 *Passiflora*	龙珠果 *Passiflora foetida*		茅膏菜属 *Drosera*	茅膏草 *Drosera peltata*
豆科 Fabaceae	含羞草属 *Mimosa*	含羞草 *Mimosa pudica*	苋科 Amaranthaceae	牛膝属 *Achyranthes*	牛膝 *Achyranthes bidentata*	莎草科 Cyperaceae	莎草属 *Cyperus*	莎草 *Cyperus rotundus*
锦葵科 Malvaceae	黄花棯属 *Sida*	黄花棯 *Sida acuta*				鸭跖草科 Commelinaceae	鸭跖草属 *Murdannia*	水竹叶 *Murdannia triguetra*
大戟科 Euphorbiaceae	油柑属 *Phyllanthus*	叶下珠 *Phyllanthus urinaria*	鸭跖草科 Commelinaceae	鸭跖草属 *Murdannia*	水竹叶 *Murdannia triguetra*	大戟科 Euphorbiaceae	油柑属 *Phyllanthus*	叶下珠 *Phyllanthus urinaria*
鸭跖草科 Commelinaceae	鸭跖草属 *Murdannia*	水竹叶 *Murdannia triguetra*						

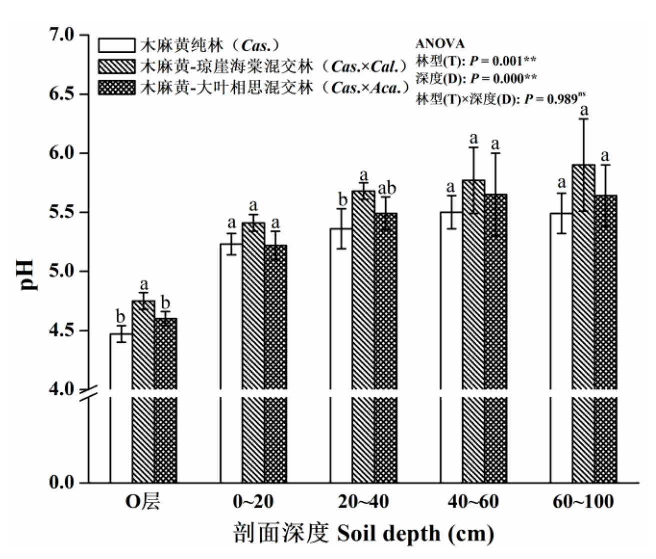
1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理，SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析，用单因素方差分析比较 3 种森林类型同一土层土壤理化性质的差异性，利用最小差异显著性法（LSD）对各水平间的差异进行分析，用双因素方差分析对 3 种森林类型、不同土层对土壤理化性质的交互影响进行分析，用 Pearson 相关性对土壤理化性质间的相关性进行分析，显著性水平设置为 $P<0.05$。统计图使用 Origin8.0 软件进行制作。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型土壤 pH 分布特征

由图 2 可知，不同林分下土壤 pH 随剖面深度的增加呈逐渐增加的趋势，其中木麻黄纯林、木麻黄-琼崖海棠混交林、木麻黄-大叶相思混交林 pH 变幅为分别为 4.47~5.50、4.75~5.90、4.60~5.65。三种林分类型间 pH 大小顺序为木麻黄-琼崖海棠混交林>木麻黄-大叶相思混交林、木麻黄纯林，其中，在腐殖质层和 20~40 cm 土层下各林分 pH 间差异显著（$P<0.05$）；腐殖质层，木麻黄-琼崖海棠混交林显著高于其他两种林分，较木麻黄纯林高 0.27 个单位，增幅达 6.11%，较木麻黄-大叶相思混交林高 0.15 个单位，增幅达 3.26%；20~40 cm 土层，木麻黄-琼崖海棠混交林较木麻黄纯林高 0.32 个单位，增幅为 5.97%。通过方差分析发现，林分类型和剖面深度均对 pH 有极显著的影响（$P<0.01$），林型和剖面深度的交互作用则对 pH 无显著影响。



*，**分别表示在 0.05，0.01 水平上差异显著。下同

*, ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels. The same below.

图 2 不同林分类型土壤剖面 pH 分布特征

Fig. 2 pH distribution characteristics of soil profile in different plantations

2.2 土壤剖面有机碳和全氮分布特征

不同林分土壤剖面有机碳和全氮含量以及 C/N 分布特征如图 3 所示。由图 3 可知，土壤有机碳和全氮含量均随剖面深度的增加呈显著降低的趋势，其中木麻黄纯林、木麻黄-琼崖海棠混交林、木麻黄-大叶相思混交林土壤有机碳含量变幅分别为 0.08~8.80、0.37~20.80、0.79~24.62 g kg^{-1}，全氮含量变幅分别为 0.03~0.48、0.05~0.69、0.08~0.83 g kg^{-1}。三种林分类型间土壤有机碳和全氮含量的大小顺序标线为木麻黄-大叶相思混交林>木麻黄-琼崖海棠混交林>木麻黄纯林，其中，不同土层各林分间差异均达到显著水平（P<0.05）；与木麻黄纯林相比，木麻黄-琼崖海棠混交林各层土壤有机碳和全氮含量增幅范围分别为 69.8%~358.3%和 44.1%~160.7%，而木麻黄-大叶相思混交林增幅范围分别为 90.2%~908.3%和 31.4%~210.7%，有机碳含量增幅高于全氮增幅。从 C/N 比来看，依然为腐殖质层高于其他土层，木麻黄-大叶相思混交林显著高于木麻黄纯林。从方差分析可以看出，林分类型、剖面深度以及二者的交互作用对土壤有机碳含量、全氮含量以及 C/N 均有极显著影响。

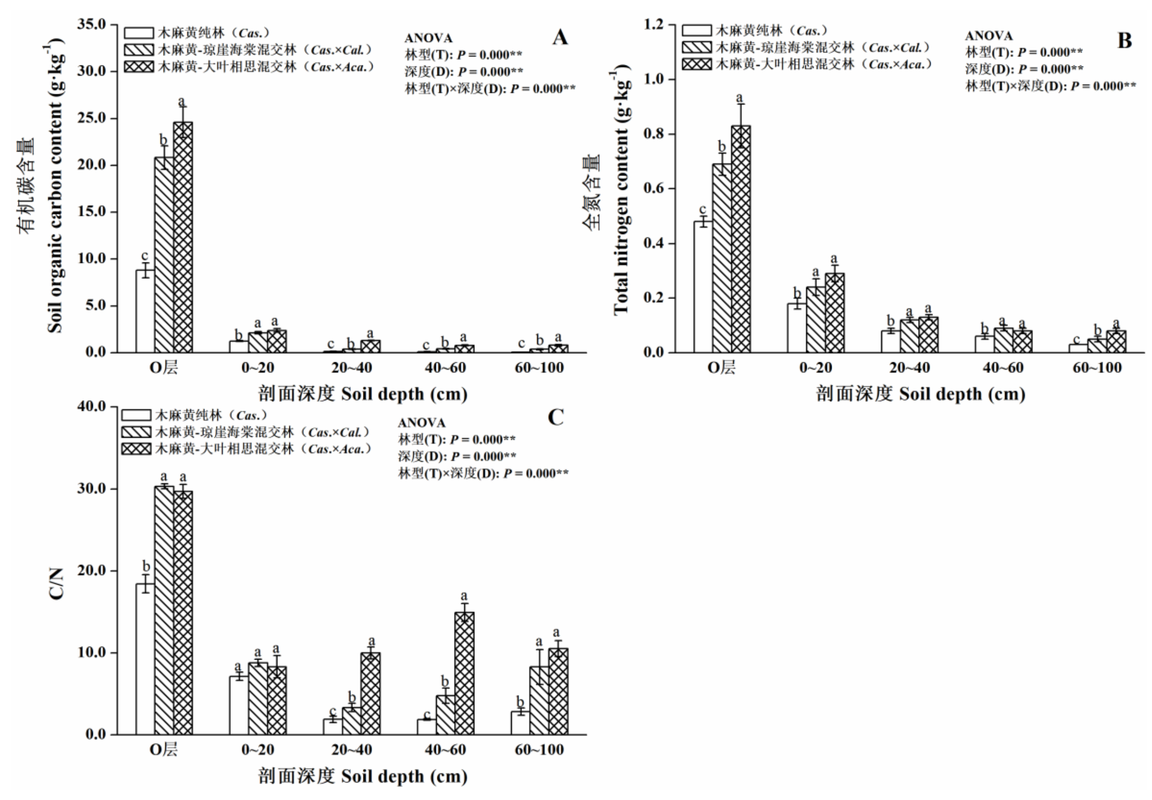


图 3 不同林分类型土壤剖面有机碳含量、全氮含量和 C/N 分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics soil organic carbon content, total nitrogen content and C/N of soil profile in different plantations

2.3 土壤剖面全磷和全钾分布特征

由图 4 可知，土壤全磷和全钾含量均随剖面深度的增加呈降低的趋势。木麻黄纯林、木麻黄-琼崖海棠混交林、木麻黄-大叶相思混交林剖面土壤全磷含量变幅分别为 0.107~0.287、0.137~0.300、0.149~0.337 g ·kg^{-1}，全钾含量变幅分别为 0.098%~0.133%、0.112%~0.142%、0.120%~0.150%，三种林分类型间土壤全磷和全钾含量的大小顺序基本表现为木麻黄纯林小于木麻黄-大叶相思混交林和木麻黄-琼崖海棠混交林。就全磷含量而言，0~20 cm 土层下，木麻黄-琼崖海棠混交林显著高于木麻黄纯林和木麻黄-大叶相思混交林，增幅分别为 39.6%和 23.4%，而在 20~100 cm 各土层下木麻黄混交林均显著高于木麻黄纯林，木麻黄-琼崖海棠混交林增幅为 20.8%~28.2%、木麻黄-大叶相思混交林增幅为 25.0%~39.6%；就全钾含量而言，40~60 cm 土层下，木麻增-大叶相思混交林显著高于木麻黄纯林，增幅为 20.6%。从方差分析结果来看，林分类型、剖面深度均对全磷和全钾含量有极显著影响，而二者交互作用均对全磷含量有极显著影响（P<0.01）。

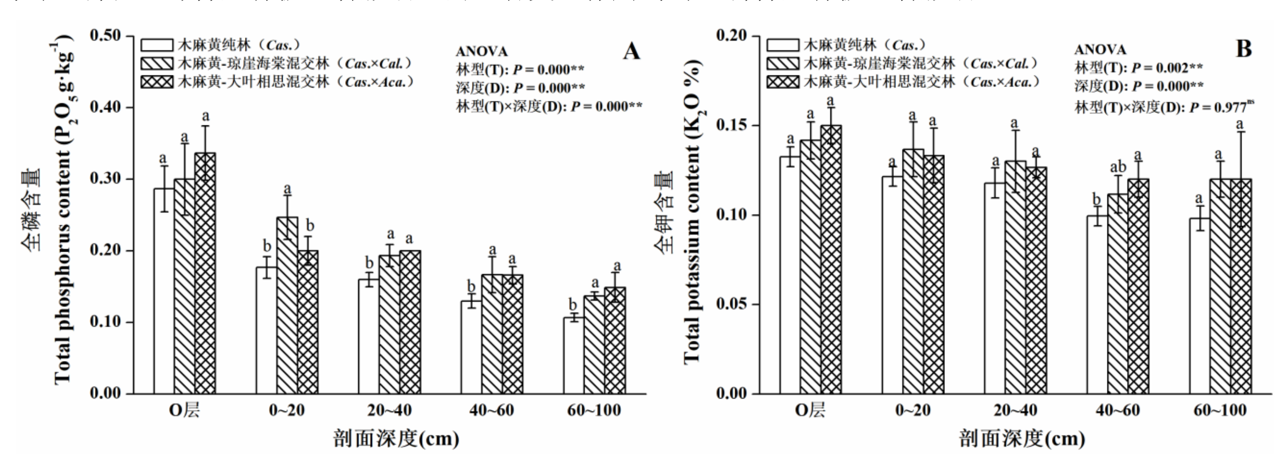


图 4 不同林分类型土壤剖面全磷含量和全钾含量分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of total phosphorus and total potassium contents of soil profile in different plantations

2.4 土壤剖面速效养分分布特征

不同林分下土壤剖面速效养分分布特征如图 5 所示。三种林分类型有效磷含量变幅分别为木麻黄纯林 1.30~1.74 mg kg^{-1}、木麻黄-琼崖海棠混交林 1.66~2.09 mg kg^{-1}、木麻黄-大叶相思混交林 1.29~2.21 mg kg^{-1}，其中，木麻黄纯林的腐殖质层有效磷含量低于其他土层，而两种混交林的腐殖质层则高于其他土层，且随剖面深度的增加呈降低的趋势，同时，两种混交林腐殖质层显著高于木麻黄纯林，增幅分别为 60.5%和 70.2%，然而较深层次（20~100 cm）土壤下，木麻黄-大叶相思混交林有效磷含量相对其他两种林型较低。方差分析表明，林分类型、剖面深度以及二者交互作用均对有效磷含量有极显著影响（P<0.01）。

随剖面深度的增加，各林分速效钾含量均呈降低的趋势。三种林分类型土壤速效钾含量变幅为木麻黄纯林 2.05~13.58 mg kg^{-1}、木麻黄-琼崖海棠混交林 2.47~14.23 mg kg^{-1}、木麻黄-大叶相思混交林 3.70~16.22 mg kg^{-1}；各土层速效钾含量均表现为木麻黄-大叶相思混交林>木麻黄-琼崖海棠混交林>木麻黄纯林，与木麻黄纯林相比，木麻黄-琼崖海棠混交林和木麻黄-大叶相思混交林各土层速效钾含量增幅分别为 4.8~87.2%和 19.4~98.2%。方差分析显示，林分类型和剖面深度均对速效钾含量均有极显著影响（P<0.01），而二者交互作用对其无显著影响。

均随剖面深度的增加，硝态氮和铵态氮含量呈明显降低的趋势，腐殖质层显著高于其他土层。腐殖质层下的各林分间土壤硝态氮和铵态氮含量差异显著，其中木麻黄-大叶相思混交林均显著高于木麻黄纯林和木麻黄-琼崖海棠混交林，硝态氮含量增幅分别为 21.8%和 21.0%、铵态氮含量增幅分别为 162.6%和 66.8%。方差分析表明，林分类型、剖面深度以及二者交互作用均对硝态氮和铵态氮含量有极显著影响（P<0.01）。

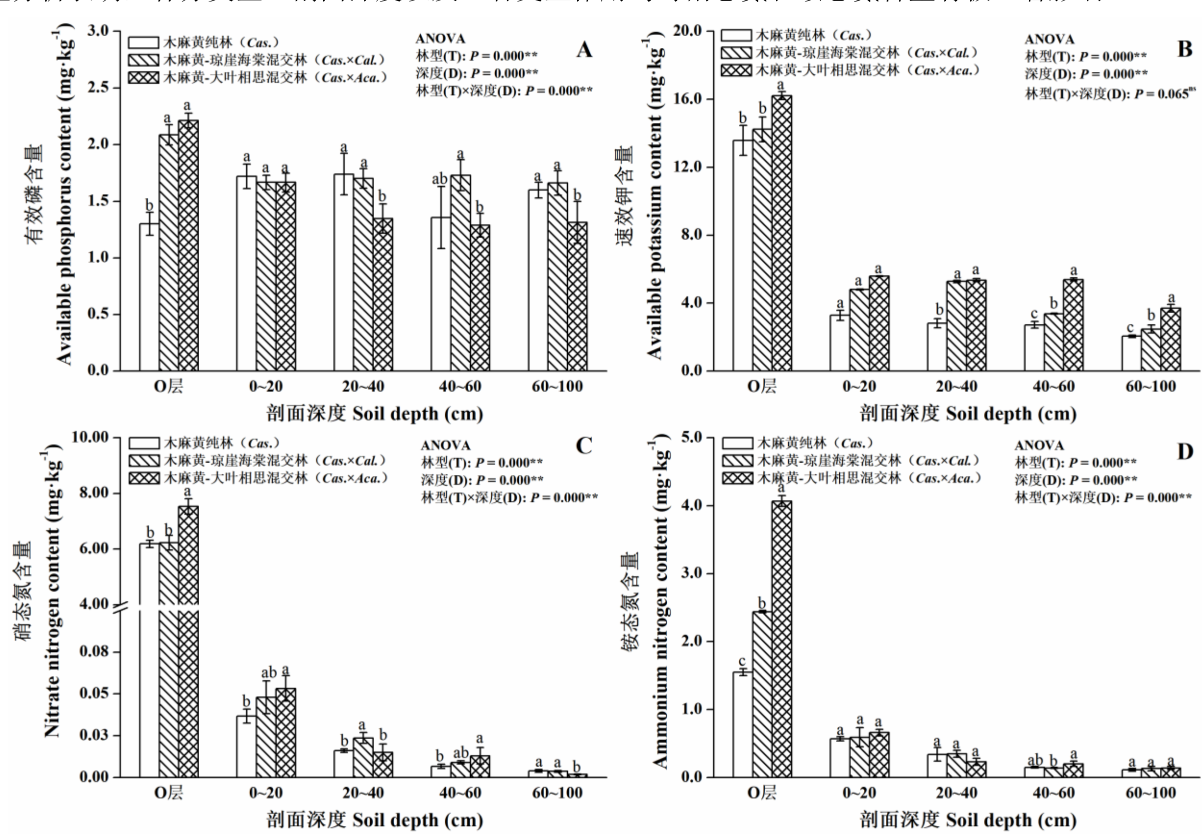


图 5 不同林分类型土壤剖面有效磷、速效钾、硝态氮和铵态氮含量分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of soil profile available phosphorus, available potassium, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in different plantations

2.5 土壤剖面理化性状相关分析

通过分析三种林分条件下不同理化性状之间的相关关系发现（表 3），土壤 pH 与有机碳、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、硝态氮和铵态氮含量均呈显著或极显著的负相关关系，其他土壤养分含量间均呈

显著或极显著的正相关关系，其中，有机碳含量与全氮、硝态氮以及铵态氮含量间的相关系数高于其他指标。

表 3 木麻黄林土壤理化性质间的相关关系

Table 3 Correlation coefficients between different soil physico-chemistry properties of different kinds of *Casuarina equisetifolia* plantations

项目 Item	pH	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	速效磷 AP	速效钾 AK	硝态氮 NIN	铵态氮 AMN
pH	1								
有机碳 SOC	-0.749**	1							
全氮 TN	-0.807**	0.968**	1						
全磷 TP	-0.773**	0.830**	0.895**	1					
全钾 TK	-0.436**	0.582**	0.664**	0.687**	1				
有效磷 AP	-0.295*	0.639**	0.582**	0.476**	0.387**	1			
速效钾 AK	-0.785**	0.917**	0.934**	0.868**	0.604**	0.410**	1		
硝态氮 NIN	-0.832**	0.937**	0.939**	0.832**	0.532**	0.462**	0.962**	1	
铵态氮 AMN	-0.769**	0.973**	0.962**	0.843**	0.600**	0.641**	0.904**	0.925**	1

注：*，**分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关。**SOC**. 有机碳；**TN**. 全氮；**TP**. 全磷；**TK**. 全钾；**AP**. 速效磷；**AK**. 速效钾；**NIN**. 硝态氮；**AMN**. 铵态氮。

Note: *, ** indicate the significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively. **SOC**. Soil organic carbon; **TN**. Total nitrogen; **TP**. Total phousphorus; **TK**. Total potassium; **AP**. Available phousphorus; **AK**. Available potassium; **NIN**. Nitrate nitrogen; **AMN**. Ammonium nitrogen.

3 讨论与结论

本研究结果表明，与木麻黄纯林相比，木麻黄-琼崖海棠混交林可有效改善土壤酸度，提高各层土壤 pH，而木麻黄-大叶相思混交林与木麻黄纯林间无显著差异。总的来看，混交林模式改善土壤 pH 的作用机制可能有以下三方面原因。一方面，酚酸类是土壤最具化感潜力的化学物质之一，纯林根系分泌物中各类酚酸物质的含量均显著高于混交林，而酚酸含量又与土壤 pH 呈负相关，因此，与纯林相比，混交林根系间的相互作用减弱了根系分泌物的酚酸物质含量，进而改善土壤 pH（柴旭光，2016）；另一方面，混交林枯落物产量和丰富度高于纯林（赵燕波等，2015），从而产生更多的中间产物和腐殖质，而有机质中的酸性基团（—COOH）提供了大量的阳离子交换位点，枯落物物通过释放更多的阳离子，进而中和土壤氢离子，减缓土壤的酸化（汪思龙和陈楚莹，1992）；第三方面，有学者认为混交林种植可以会通过提升土壤 pH 进而抑制土壤铝有效性，对缓解植物铝毒有改善作用（雷波等，2014）。综上所述，合理的混交林模式在一定程度上可以减缓木麻黄林地土壤的酸化。

土壤有机质是衡量森林土壤肥力的重要指标，其主要来源于植物地上枯落物和地下根系的输入，是指示土壤肥力与健康的关键指标（杨承栋，2016）。本研究表明，不同木麻黄林分类型土壤有机碳和全氮含量总体随土层加深呈下降趋势，腐殖质层有机碳和全氮含量明显高于其他各层土壤，表现明显的“表聚”现象，且琼崖海棠、大叶相思与木麻黄混交林的这种现象较木麻黄纯林更明显。一方面，森林枯落物归还到土壤中后，主要覆盖在地表，而枯落物中主要成分为碳、其次为氮，二者在地表逐年富集进而造成了明显的层次性；另一方面，混交林与纯林相比，混合枯落物的非加和效应加速了其分解和转化速率，进而有效提升了土壤有机碳含量，增强林地容蓄能力，更有利于混交林植物的生长和林分的稳定（熊勇等，2012）。两种混交林比较，木麻黄-大叶相思混交林的层次性更明显，一方面与大叶相思混交林枯落物产量高于琼崖海棠混交林有关（薛杨等，2014）；另一方面可能是大叶相思的根瘤菌固定氮气，对土壤的增氮效果和改土效果较好（唐国勇等，2012）。以往研究表明，大叶相思人工林的树冠较高，叶面积大，枯落物产量高

且分解快，养分元素能够较快的进行系统内循环，维持土壤肥力，同时还可有效降低风速，削弱强风影响，提高林分防护功能（高成杰等，2014）。生产中值得注意的是，大叶相思树冠开展，在木麻黄和大叶相思混交造林时，最好将两个树种交接行的行距适当加大，以避免木麻黄受到庇荫而影响生长，或者在生长后期对大叶相思做适当修剪，减少种间树冠过度重叠（陈德旺，2003）。

本研究发现，与木麻黄纯林相比，两种混交林对土壤全磷含量的改善效果均较好，对全钾含量亦有一定的提升作用。主要由于滨海沙地保水保肥能力差，加之降雨量集中且大，造成土壤中钾离子径流、淋洗损失严重（丁效东等，2016），通过混交林种植可以增加植被覆盖度，起到抗侵蚀作用；另外，还可通过产生大量的枯落物输入到土壤中的磷和钾量增加，进而提高土壤全磷和全钾贮量。从土壤速效养分来看，速效钾、硝态氮和铵态氮含量在不同林分类型下均表现出明显的“表聚”现象，主要原因为腐殖质层和上层土壤中有机质含量较高，降低了速效养分随降雨向下层土壤淋洗。通过分析土壤理化性质之间的相关性发现，土壤 pH 与有机碳、全氮、全磷、全钾以及速效养分含量均呈显著或极显著的负相关关系，而土壤养分间均呈现显著或极显著的正相关关系。以往研究认为，在适当降低土壤 pH 的情况下，提高养分含量，可以增加人工林的土壤微生物数量，进而改善林地土壤微生态环境（梁国华等，2015）。综上所述，木麻黄不同林分类型下的土壤理化性质存在差异，生产实践中，可以通过合理的混交林种植来改善林内枯落物的组成及性质，不断提高土壤中有机质含量，改善土壤理化性质和土壤肥力，进而促使滨海沙地木麻黄防风林的可持续生产和发展。

参考文献:

CHAI XG, 2016. Effect of stand composition variation of pH value and content of organic matter[J]. Prot For Sci Technol, 34(10): 27-28. [柴旭光，2016. 林分组成对林下土壤 pH 及有机质含量变化的影响[J]. 防护林科技，34(10)：27-28.]

CHEN DZ, Ye GF, Gao W, et al., 2018. Ecological response of *Casuarina equisetifolia* to environmental stress in coastal dunes in China[J]. J For Res, 23(3): 1-10.

CHEN DW, 2003. Study on the growth, protective function and soil fertility of mixed forest of *Casuarina* and *Acacia auriculaeformis*[J]. For Sci Technol, 8(3): 13-15.[陈德旺，2003. 木麻黄大叶相思混交林生长效果、防护功能和土壤肥力研究[J]. 防护林科技，8(3)：13-15.]

DING XD, ZHANG SR, LOU JH, et al., 2016. Effects of combined organic manure and phosphorus fertilizer on the phosphorus leaching risk in coastal saline soil[J]. Ecol Environ Sci, 25(7): 1169-1173. [丁效东，张士荣，娄金华，等，2016. 有机肥与磷肥配施对滨海盐渍化土壤磷素淋洗风险的影响[J]. 生态环境学报，25(7)：1169-1173.]

DU JH, LIU AL, DONG YX, et al., 2014. Architectural characteristics of roots in typical coastal psammophytes of South China[J]. Chin J Plant Ecol, 38(8): 888-895. [杜建会，刘安隆，董玉祥，等，2014. 华南海岸典型沙生植物根系构型特征[J]. 植物生态学报，38(8)：888-895.]

FENG J, LIU Q, WANG J, et al., 2016. Effects of leachates from *Casuarina equisetifolia* on growth and physiological and biochemical characteristics of *Terminalia catappa* seedlings[J]. Guihaia, 36(3): 308-314. [冯剑，刘强，王瑾，等，2016. 木麻黄浸提液对榄仁树幼苗生长及生理生化的影响[J]. 广西植物，36(3)：308-314.]

GAO CJ, LI K, TANG GY, et al., 2014. Nutrient accumulation and cycling in pure and mixed plantations of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* in a dry-hot valley, Yunnan Province, southwest China[J]. Chin J Appl Ecol, 25(7): 1889-1897. [高成杰，李昆，唐国勇，等，2014. 云南干热河谷印楝和大叶相思人工纯林与混交林养分循环特征[J]. 应用生态学报，25(7)：1889-1897.]

HUANG SJ, ZENG Q, ZHANG LH, et al., 2009. Effects of tannin extracted from *Casuarina equisetifolia* branchlets on the growth and tannin contents of its seedlings[J]. J Trop Subtrop Bot, 17(5): 471-476. [黄舒静，曾

琦，张立华，等，2009. 短枝木麻黄小枝单宁对其幼苗生长及单宁含量的效应[J]. 热带亚热带植物学报，17(5)：471-476.]

LEELAMANIE D, 2016. Occurrence and distribution of water repellency in size fractionated coastal dune sand in Sri Lanka under *Casuarina* shelterbelt[J]. Catena, 142: 206-212.

LEI B, LIU B, LUO CD, et al., 2014. Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity[J]. Acta Ecol Sin, 34(11): 2884-2891. [雷波，刘彬，罗承德，等，2014. 杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用[J]. 生态学报，34(11)：2884-2891.]

LIANG GH, WU JP, XIONG X, et al., 2015. Responses of soil pH value and soil microbial biomass carbon and nitrogen to simulated acid rain in three successional subtropical forests at Dinghushan Nature Reserve[J]. Ecol Environ Sci, 24(6): 911-918. [梁国华，吴建平，熊鑫，等，2015. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤 pH 值和土壤微生物量碳氮对模拟酸雨的响应[J]. 生态环境学报，24(6)：911-918.]

LIU CL, RAN YH, TAO Y, et al., 2013. The present situation investigation of coastline *Casuarina* forest in Hainan Island[J]. For Resour Manag, 4(2): 102-106. [刘成路，冉焰辉，陶悠，等，2013. 海南岛海岸线木麻黄林现状调查[J]. 林业资源管理，4(2)：102-106.]

LU RK, 2000. Analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. [鲁如坤，2000. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社.]

PEREIRA APA, DURRER A, GUMIERE T, et al., 2019. Mixed *Eucalyptus* plantations induce changes in microbial communities and increase biological functions in the soil and litter layers[J]. For Ecol Manag, 433: 332-342.

SHENG WT, 2018. On the maintenance of long-term productivity of plantation in China[J]. For Res, 31(1): 1-14. [盛炜彤，2018. 关于我国人工林长期生产力的保持[J]. 林业科学研究，31(1)：1-14.]

TANG GY, LI K, SUN YY, et al., 2012. Nitrogen-fixation potential of nodules in four types of nitrogen-fixation plants and their influencing factors in dry-hot valley[J]. For Res, 25(4): 432-437. [唐国勇，李昆，孙永玉，等，2012. 干热河谷 4 种固氮植物根瘤固氮潜力及其影响因素[J]. 林业科学研究，25(4)：432-437.]

WANG SL, CHEN CY, 1992. Preliminary studies on the buffering effects of forest litter on soil acidification[J]. Chin J Environ Sci, 13(5): 36-41. [汪思龙，陈楚莹，1992. 森林凋落物对土壤酸化缓冲作用的初步研究[J]. 环境科学，13(5)：36-41.]

WANG X, LI HM, CAO TT, et al., 2017. The diversity of soil fungi and allelopathic potentials of special fungal metabolites in *Casuarina equisetifolia* woodlands of different stand ages[J]. Chin J Appl Environ Biol, 23(4): 670-677. [王璇，李慧敏，曹婷婷，等，2017. 不同林龄木麻黄林地土壤真菌多样性及特有真菌代谢产物化感潜力[J]. 应用与环境生物学报，23(4)：670-677.]

XIONG Y, XU GQ, WU L, 2012. Progress on non-additive effects of mixed litter decomposition[J]. Environ Sci Technol, 35(9): 56-60. [熊勇，许光勤，吴兰，2012. 混合凋落物分解非加和性效应研究进展[J]. 环境科学与技术，35(9)：56-60.]

XU ZX, LI XR, CAI LZ, et al., 2018. Analysis of soil microbial community and enzyme activity of *Casuarina equisetifolia* plantations at different stand ages in Hainan[J]. J Nw A & F Univ (Nat Sci Ed), 46(10): 1-14. [徐志霞，李小容，蔡莲子，等，2018. 海南不同林龄木麻黄海防林土壤微生物群落组成与酶活性的动态分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，46(10)：24-34.]

XUE Y, CHEN YQ, LIU XZ, et al, 2014. Comparisons of soil chemical properties under four typical forest stands in Northeast Hainan[J]. Ecol Sci, 33(6): 1142-1146. [薛杨，陈毅青，刘宪钊，等，2014. 海南东北部 4 种典型人工林土壤化学性质研究[J]. 生态科学，33(6)：1142-1146.]

YANG B, HAO QY, 2020. Selection of mixed species of *Casuarina equisetifolia* L. based on natural regeneration properties[J]. Plant Sci J, 38(2): 221-232. [杨彬，郝清玉，2020. 基于天然更新性能筛选海南岛木麻黄海防林混交树种[J]. 植物科学学报，38(2)：221-232.]

YANG CD, 2016. Decline of quantity and quality of soil organic matter is the key factor restricting the growth of

plantation in China[J]. Sci Silv Sin, 52(12): 1-12. [杨承栋，2016. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子[J]. 林业科学，52（12）：1-12.]
YAO XJ, GAO Y, DU YY, et al., 2013. Spatial and temporal changes of Hainan coastline in the past 30 years based on RS[J]. J Nat Resour, 28(1): 114-125. [姚晓静，高义，杜云艳，等，2013. 基于遥感技术的近 30 a 海南岛海岸线时空变化[J]. 自然资源学报，28（1）：114-125.]
ZHAO YB, JI TW, ZHANG DJ, et al., 2015. Soil physi-chemical properties, biomass and nutrient contents of forest litter in mixed plantations of *Eucalyptus grandis* and three tree species[J]. Chin J Appl Environ Biol, 21(5): 948-953. [赵燕波，纪托未，张丹桔，等，2015. 3 个树种与巨桉混交土壤理化性质、凋落物量和养分含量特征[J]. 应用与环境生物学报，21（5）：948-953.]
ZHONG CL, BAI JY, ZHANG Y, 2005. Introduction and Conservation of *Casuarina* trees in China[J]. For Res, 18(3): 345-350. [仲崇禄，白嘉雨，张勇，2005. 我国木麻黄种质资源引种与保存[J]. 林业科学研究，18（3）：345-350.]
ZHOU LT, LI JJ, LUO Y, et al., 2019. Variation in soil fungal community structure during successive rotations of *Casuarina equisetifolia* plantations as determined by high-throughput sequencing analysis[J]. Plant Growth Regul, 87（3）: 445-453.